

Étude des performances dynamiques d'un pyromètre infrarouge

Jean THEVENET^{1*}, Monica SIROUX¹, Bernard DESMET¹ et Stéphane LEFEVRE²

¹Laboratoire de Mécanique et Énergétique - Université de Valenciennes et du Hainaut-Cambrésis
Le Mont Houy - 59313 Valenciennes Cedex 9

²Institut Nationale des Sciences Appliquées de Lyon - Centre Thermique de Lyon
9, rue de la Physique - 69621 Villeurbanne cedex

* (auteur correspondant : jean.thevenet@univ-valenciennes.fr)

Résumé - La mesure de température par radiométrie d'une surface en mouvement est réalisée en régime transitoire avec, parfois, des gradients spatiaux importants. Ainsi la maîtrise des performances dynamiques, de la résolution spatiale et du bruit du capteur est indispensable à l'obtention du véritable profil de température. Nous proposons dans cet article un moyen de caractériser ces différents éléments, qui nous permettront de simuler le signal reçu par un pyromètre et valider le modèle obtenu par des essais sur un disque tournant.

Nomenclature

t	temps, s
L	luminance, $W.m^{-3}.sr^{-1}$
S	surface, m^2
T	température, K
H	fonction de transfert
G	fonction de transfert inverse
b	bruit
E	entrée
E^*	entrée bruitée
R	rayon, m
d	distance, m
p	variable de Laplace
z	variable complexe

<i>Symboles grecs</i>	
ε	émissivité
τ	temps de réponse, s
θ	angle, rad
δ	position, m
λ	longueur d'onde, μm
ω	pulsation, $rad.s^{-1}$
<i>Indices et exposants</i>	
Ag	peinture argentée
n	normal
$noire$	peinture noire
tot	surface entière
λ	monochromatique

1. Introduction

Les caractéristiques principales des capteurs radiométriques (pyromètres, thermographie infrarouge ...) sont leur résolution spatiale et leur temps de réponse. Dans le cas d'une mesure sur des objets en mouvements rapides tels que des disques tournants et présentant des gradients locaux de température, la connaissance de ces deux caractéristiques est indispensable à la maîtrise de la mesure de température. Dans la bibliographie les techniques radiométriques sont souvent abordées de manière globale [1,2,3,4] et se limitent à une utilisation d'un outil de mesure dans son domaine fréquentiel de fonctionnement. Benillouche [5] met en évidence la problématique des mesures radiométriques de température sur des objets tournants et donc la conséquence du temps de réponse des capteurs sur les images issues d'une caméra lorsque la vitesse des objets est trop rapide par rapport au temps d'équilibre du capteur. Gaussorgues [6] présente une technique de détermination de la résolution spatiale (pouvoir séparateur) d'une caméra de thermographie en utilisant des fentes d'épaisseur réglable. Cependant la caractérisation spatio-temporelle des capteurs radiométriques sur des disques tournants est peu abordée dans la bibliographie. L'objectif de

cet article est de remonter à la température réelle sur un disque tournant à partir des mesures fournies par un pyromètre et de l'étude de la réponse temporelle et de la résolution spatiale. À partir des réponses spatiale et temporelle on peut simuler le signal reçu par le capteur face à un disque tournant qui comporte deux zones d'émissivités différentes et valider le modèle obtenu par des essais sur le disque tournant. Une étude du bruit du capteur est également réalisée afin d'obtenir le signal de température le plus proche possible du signal réel.

2. Caractérisation spatiale et temporelle du pyromètre infrarouge

2.1. Dispositif expérimental

L'objectif est la détermination du diamètre du spot de détection et la caractérisation du temps de réponse d'un pyromètre. Le pyromètre utilisé est de type COLE-PALMER 8158-30. Le dispositif expérimental utilisé est composé d'une plaque de 10 cm de côté, recouverte de deux peintures différentes pour former deux zones distinctes d'émissivités différentes (voir Fig. 1). Cette distribution d'émissivité va simuler une non-uniformité de température. Nous avons choisi une peinture noire d'émissivité connue $0,93 \pm 0,02$ et une peinture métallique dont nous avons déterminé l'émissivité ($0,37 \pm 0,01$). Une résistance électrique permet de chauffer la plaque, dont la température est mesurée à l'aide d'un thermocouple de type K. Pendant les essais la température de la plaque est de $76,7^\circ\text{C}$. Un écran permet de limiter les interactions avec l'environnement proche de la cible et une table de déplacement permet de déplacer la plaque par rapport à l'axe du pyromètre avec une précision de 0,1 mm.

2.2. Détermination du diamètre spot de détection

La plaque est déplacée devant le pyromètre, avec un pas de 3 mm, de sorte que la surface émettrice présente successivement une surface noire, une zone de mesure répartie entre les deux couleurs et une surface argentée. Le pyromètre est sensible au rayonnement infrarouge compris entre $8\mu\text{m}$ et $14\mu\text{m}$ et mesure un flux spectral centré sur $11\mu\text{m}$. La température de la plaque étant de $76,7^\circ\text{C}$, l'approximation de Wien peut être appliquée à la loi du corps noir ($\lambda T \ll 14000 \mu\text{m.K}$) :

$$L_{\lambda,n}(T) = \varepsilon_{\lambda,n}(T) \frac{c_1 \lambda^{-5}}{\exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right)} \quad (1)$$

avec $c_1 = 1,19 \cdot 10^{-16} \text{ W.m}^{-2}$ et $c_2 = 14388 \mu\text{m.K}^{-1}$

La luminance incidente sur le pyromètre est la contribution de l'émission de la cible et de la luminance des objets environnants réfléchi par la cible vers le pyromètre :

$$L_{\lambda,n,r}(T) = \varepsilon_{\lambda,n}(T) L_{\lambda,n}(T) + (1 - \varepsilon_{\lambda,n}(T)) L_{\lambda,n}(T_{env}) \quad (2)$$

Cette expression montre qu'une variation d'émissivité thermique s'apparente à une variation de température sur la luminance provenant de la plaque. De plus, le flux total reçu par le pyromètre dépend de toutes les luminances émises par chaque élément de surface de la cible, de sorte qu'il soit proportionnel à la surface émettrice. La luminance mesurée par le pyromètre est, respectivement au cours du balayage de la zone noire à la zone argentée :

$$\begin{aligned}
 L_{\lambda,n} &= L_{\lambda,n, \text{noire}} \\
 L_{\lambda,n} &= L_{\lambda,n, \text{noire}} \frac{S_{\text{noire}}}{S_{\text{tot}}} + L_{\lambda,n, \text{Ag}} \frac{S_{\text{Ag}}}{S_{\text{tot}}} \\
 L_{\lambda,n} &= L_{\lambda,n, \text{Ag}}
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

Un modèle simple, reposant sur la géométrie circulaire du spot et la position δ du centre par rapport à la zone de transition (voir Fig.2) , permet de calculer les surfaces d'émission de chaque zone peinte et de remonter, grâce aux mesures, à la fois à la position de la frontière et au diamètre du spot du pyromètre (voir Fig. 3). La taille du spot mesuré est ici de 26,4 mm ce qui supérieur au diamètre fourni par le constructeur (32% d'écart). Ceci peut être du à une incertitude sur les spécifications du constructeur (manque d'information concernant la définition de la distance pyromètre-cible et la mesure de la taille du spot).

2.3. Caractérisation du temps de réponse du pyromètre

Pour étudier le temps de réponse du pyromètre, nous avons mis en place devant la cible chaude, un obturateur photographique COPAL dont le temps d'ouverture est inférieur à 1/500^e de seconde (Fig. 1). Ce temps est *a priori* très inférieur au temps de réponse du pyromètre et permettra d'envoyer un échelon de signal vers le pyromètre. La réponse indicielle permet d'accéder au temps de réponse par la fonction de transfert du pyromètre. L'allure de la réponse du pyromètre est reportée sur la figure 4, et nous a guidés vers une modélisation du système du 1^{er} ordre. La réponse alors recherchée est de la forme :

$$F(t) = A - B \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)
 \tag{4}$$

avec A et B deux constantes dépendant des valeurs initiale et finale de la réponse indicielle. La minimisation de l'écart entre les mesures réelles et les mesures simulées à partir de l'équation (4) permet d'identifier le temps de réponse à 0,343 secondes, ainsi que les valeurs initiale et finale respectivement à 21,51 mV et 57,48 mV. Pour réaliser des mesures en régime instationnaire, il est nécessaire de prendre en compte la réponse du pyromètre. D'un point de vue systémique, nous pouvons déduire de la réponse indicielle que le pyromètre s'apparente à un filtre passe-bas dont la fonction de transfert dans l'espace de Laplace est :

$$H(p) = \frac{1}{1 + \tau p}
 \tag{5}$$

Cette fonction de transfert est utile d'une part pour simuler la réponse du pyromètre à un flux incident et d'autre part afin de remonter au signal arrivant sur le pyromètre à partir des mesures.

3. Application aux mesures sur disque tournant

Afin de vérifier la pertinence de cette modélisation sous la forme d'un système du 1^{er} ordre, nous avons réalisé des mesures sur un disque tournant qui comporte deux zones d'émissivités différentes : peinture noire et peinture métallique. En prenant en compte l'existence d'une zone intermédiaire composée à la fois d'une surface noire et d'une surface métallique, il est possible d'accéder au flux réel arrivant sur le pyromètre en fonction de la position du spot sur le disque. En appliquant ensuite la fonction de transfert du pyromètre identifiée, il a été possible de modéliser et de simuler la réponse du pyromètre placé devant ce disque pour plusieurs fréquences de rotation : 0,5 Hz, 1 Hz, 2 Hz (Fig. 5). On remarque un

bon accord entre un modèle et la mesure. On constate également sur la figure 5 que le signal issu du pyromètre est bruité. Ce bruit est généré à la fois par le détecteur et le convertisseur analogique/numérique. Ce bruit ne permet pas d'utiliser directement la fonction de transfert de l'éq. (5). Le schéma systémique du pyromètre est donné par la fig. 6. Le signal fourni par le pyromètre correspond au signal $C(\omega) = E(\omega).H(\omega) + b(\omega)$, on voit bien que si on utilise seulement $G=1/H$, on ne remonte pas directement à $E(\omega)$ mais à un signal E^* :

$$E^*(\omega) = E(\omega) + \frac{b}{H(\omega)} \quad (6)$$

Il est donc nécessaire de connaître la nature du bruit b afin par la suite de pouvoir le filtrer et ainsi remonter au signal réel d'entrée du pyromètre. Le bruit interne du pyromètre a été étudié en mesurant la température d'une cible à température constante. La méthode de la droite de Henry a démontré qu'on s'approche d'un bruit gaussien [7]. On va donc chercher à débruiter le signal et le reconstituer. L'ensemble des calculs est réalisé sous Matlab. Afin de faciliter les calculs nous avons exprimé la transformée en Z du filtre modélisant le pyromètre :

$$H(z) = \frac{0.0283}{1 - 0.9717.z^{-1}} \quad (7)$$

On a donc la relation suivante entre le signal filtré y et le signal x :

$$y(m) = \frac{x(m) - 0.9717.x(m-1)}{0.0283} \quad (8)$$

$y(m)$ valeur de y à l'instant $m \times T_e$ (T_e temps d'échantillonnage)

Cette fonction de transfert permet de réaliser la reconstitution du signal, cependant il faut débruiter le signal avant de le reconstituer. Deux méthodes de filtrage ont été employées : lissage IIR, filtre de Wiener. La figure 7 permet de visualiser l'efficacité des filtres associés à la fonction de transfert reconstituant le signal. On remarque que les 2 filtres entraînent un léger déphasage cependant le filtre de Wiener est le plus efficace concernant la suppression du bruit.

4. Conclusion

Nous avons mis au point un banc expérimental, simple d'utilisation et de mise en œuvre, permettant de caractériser le spot de détection et la réponse temporelle d'un pyromètre infrarouge. L'étude de sa fonction de transfert nous a permis de simuler le signal reçu par le capteur face à un disque tournant qui comporte deux zones d'émissivités différentes et de valider le modèle obtenu par des essais sur le disque tournant. Nous avons également mis au point un filtre permettant de débruiter le signal et en même temps de reconstituer le signal source. Les résultats sont encourageants, mais il faut encore affiner la technique avant de pouvoir effectuer des mesures sur une surface réelle ayant un profil de température inconnu.

Références

- [1] F. Cabannes, « *Température de surface : mesure radiative* », Techniques de l'Ingénieur, Traité mesures en contrôle, R 2735, 1996.
- [2] F. Cabannes, « *Pyrométrie optique* », Techniques de l'Ingénieur, traité mesures et contrôle, R 2610, 1990.

- [3] J.-P. Bardon, « *La mesure des grandeurs thermiques (température, flux de chaleur, coefficient de transfert...) aux surfaces et aux interfaces* », Proc. journées européennes du freinage, Lille, 13 et 14 mars 2002, 297-316.
- [4] P. Ferdinand, « *Thermomètres à fibre optique sans contact : pyromètres* », Techniques de l'Ingénieur, traité mesures et contrôle, R 2801, 2003.
- [5] F. Bellinouche, D. Pajani, P. Bremond et P. Potet, « *Thermographie infrarouge d'objets tournants à grande vitesse* », Revue de la SIA, 1992.
- [6] G. Gaussorgues, « *Caractérisation des systèmes infrarouges* », Techniques de l'Ingénieur, E 4080, 1997.
- [7] S. Lefèvre, « *Méetrologie thermique adaptée à un dispositif de freinage ferroviaire* », Rapport de post-doctorat, 2006

Remerciements

Les auteurs remercient la communauté européenne (fonds FEDER) pour son aide apportée au programme ST2 (Pôle Science et Technologie pour la sécurité dans les Transports – Thème 5 : Approche multiphysique et multiéchelle du freinage)

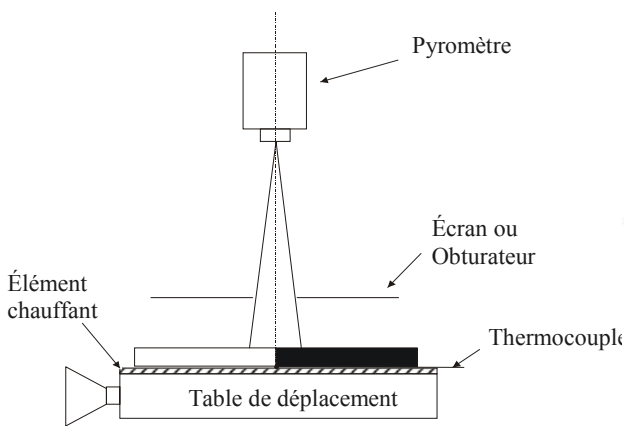


Figure 1 : Dispositif expérimental

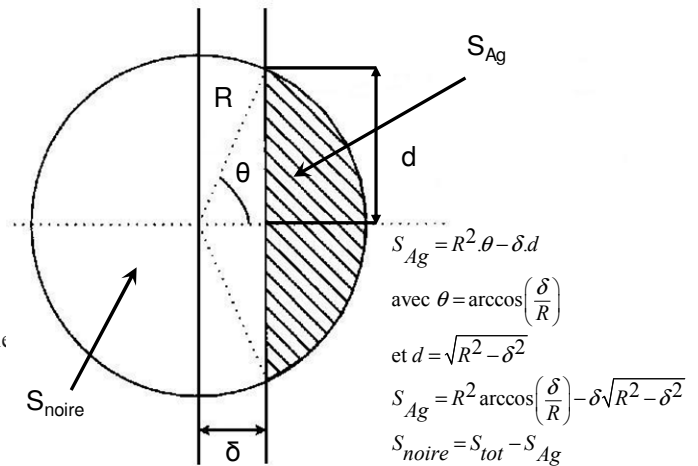


Figure 2 : Calcul des surfaces S_{noire} et S_{Ag}

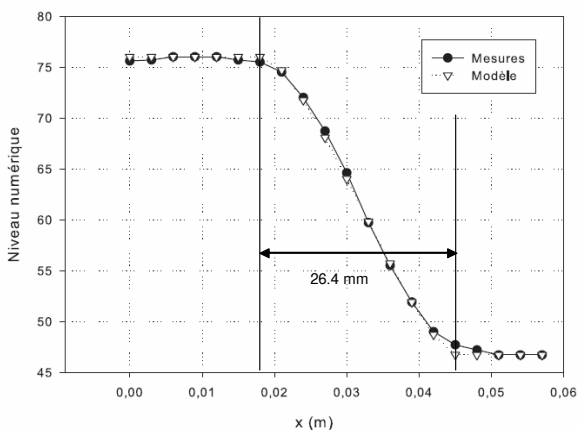


Figure 3 : Comparaison du signal infrarouge mesuré par le pyromètre sur une plaque bicolore et le modèle associé avec ses paramètres minimisés

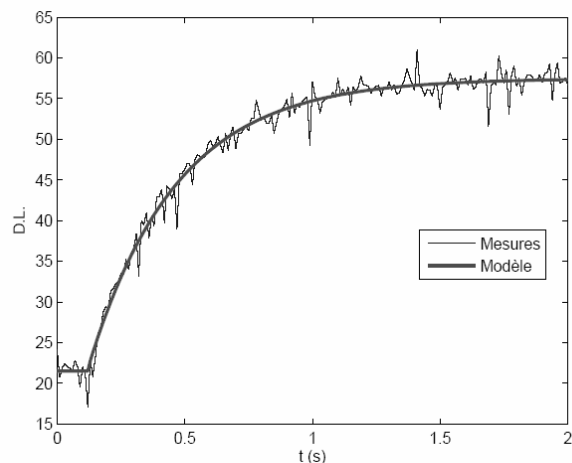


Figure 4 : Réponse du pyromètre à un échelon

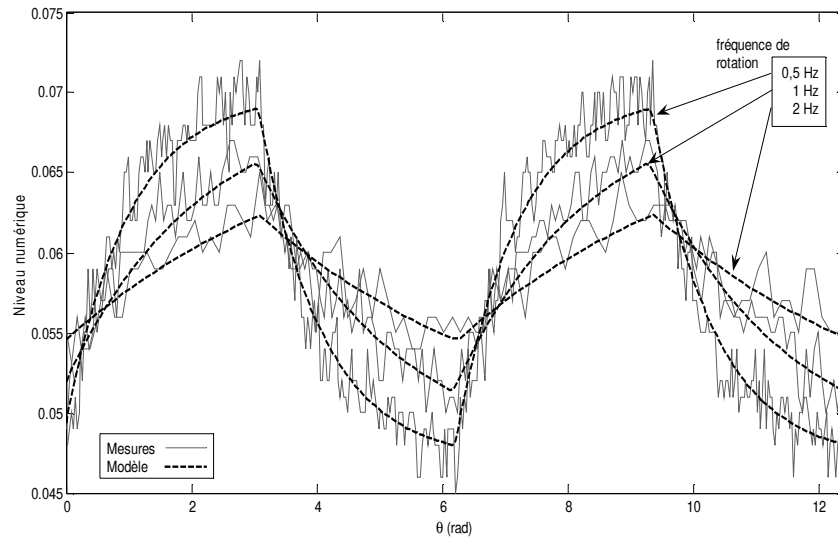


Figure 5 : Comparaison entre les mesures sur le disque tournant bicolore et le modèle associé pour deux tours de fonctionnement ($r=26,4$ mm et $R=20$ mm)

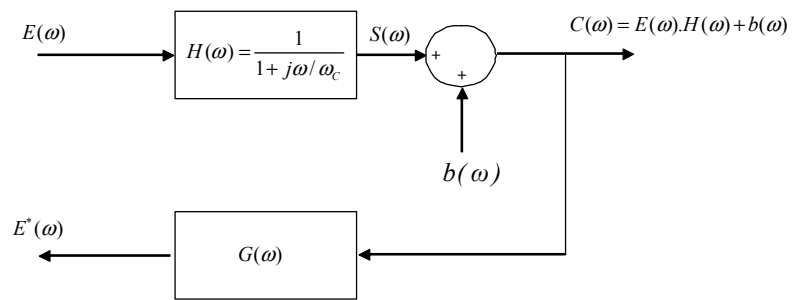


Figure 6 : Représentation systématique du pyromètre

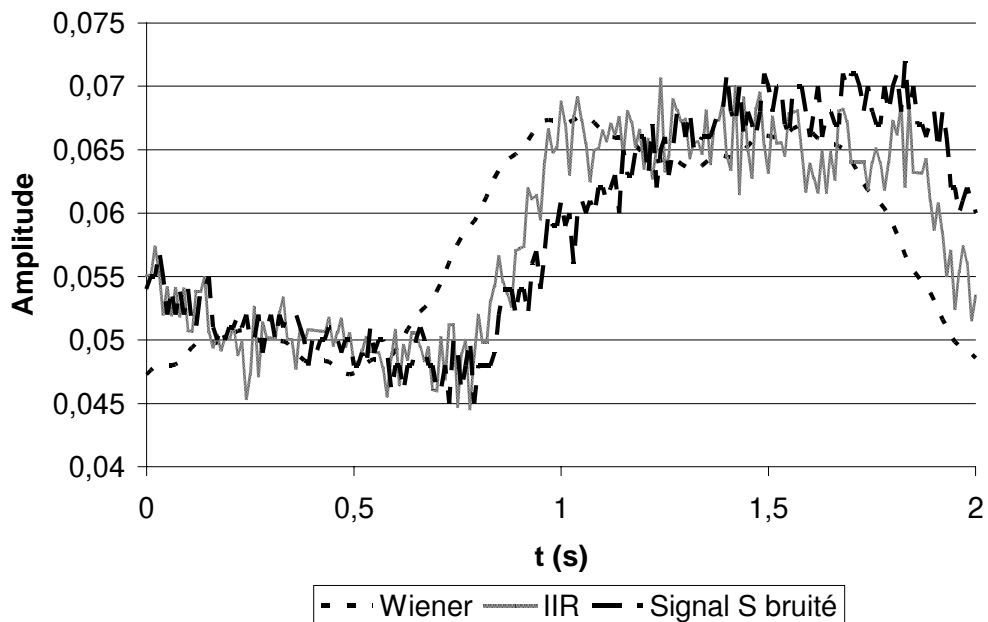


Figure 7 : Comparaison de deux filtres pour la reconstitution du signal émis par le pyromètre